



## О Т З Ы В

ведущей организации - Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» на диссертацию Гармаша Алексея Юрьевича «Изучение боттомониеподобных состояний в эксперименте Belle», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

В рамках традиционной кварковой модели к основным наблюдаемым бесцветным адронам относят мезоны, состоящие из пары кварка и антикварка, и барионы, состоящие из трёх кварков или трёх антикварков. Бесцветные состояния могут быть также построены из большего количества валентных кварков, например из двух кварков и двух антикварков (тетракварки) или четырёх кварков и одного антикварка (пентакварки). Интерес к изучению таких многокварковых адронов резко возрос в начале 21-ого века после обнаружения указаний на существование странного пентакварка ( $\theta^+$ ) и открытие коллаборацией Belle кандидата в тетракварки  $X(3872)$ . Существование странного пентакварка не нашло однозначного экспериментального подтверждения, но интерес к изучению пентакварков получил новый импульс в 2015г. после открытия пентакварков со скрытым чармом коллаборацией LHCb на коллайдере LHC. В настоящее время продолжается активный экспериментальный поиск и изучение многокварковых состояний. Для теоретического описания таких состояний привлекаются различные конкурирующие подходы, например молекулярная модель или модель системы двух дикварков. Дальнейшее изучение многокварковых состояний планируется в экспериментах на LHC, в эксперименте Belle 2, и в других экспериментах. В диссертационной работе А.Ю. Гармаша представлен цикл исследований боттомониеподобных состояний в эксперименте Belle на коллайдере KEKB. Результаты работы опубликованы в 13 журнальных статьях, из которых 12 являются официальными публикациями коллаборации Belle, и включены в мировые таблицы Particle Data Group. Большинство измерений было выполнено впервые на основе оригинальной методики, разработанной автором диссертации. Таким образом, актуальность, научная новизна, практическая ценность и высокая значимость для развития физики элементарных частиц работы представленной в диссертации не вызывает сомнений.

Диссертационная работа представляет собой законченный труд в виде введения, шести глав и заключения. Диссертация представлена на 167 страницах, включая 43 рисунка и 26 таблиц. В диссертации 143 ссылки на литературу, некоторые из которых содержат более одной статьи.

Во введении представлена мотивация данной работы и описана структура диссертации. Также во введении описан личный вклад автора в полученные результаты и сформулированы положения выносимые на защиту.

В первой главе обсуждается спектроскопия тяжёлых кваркониев и представлен краткий обзор их экспериментального изучения. В этой же главе обсуждаются теоретические



подходы к описанию низких возбуждений тяжёлых кваркониев.

Во второй главке представлено описание детектора Belle и ускорительного комплекса КЕКВ, работающего в режиме В фабрики.

Третья глава посвящена изучению процессов  $e^+e^- \rightarrow Y(nS)\pi\pi$  с  $n = 1, 2, 3$ . Было проведено измерение сечений трехчастичных процессов  $e^+e^- \rightarrow Y(nS)\pi^+\pi^-$  и  $e^+e^- \rightarrow Y(nS)\pi^0\pi^0$ . Впервые были наблюдаемы резонансы  $Z_b(10610)^\pm$  и  $Z_b(10650)^\pm$ , и измерены их массы и ширины в распадах на  $Y(1,2,3S)\pi^\pm$  и  $h_b(1,2P)\pi^\pm$ . Для процесса  $e^+e^- \rightarrow Y(nS)\pi^+\pi^-$  был проведён амплитудный анализ, позволивший определить спин-чётность  $Z_b(10610)^\pm$  ( $1^+$ ) и  $Z_b(10650)^\pm$  ( $1^+$ ) состояний. Анализ процесса  $e^+e^- \rightarrow Y(nS)\pi^0\pi^0$  позволил установить существование нейтрального партнера  $Z_b(10610)^0$  на уровне 6.5 стандартных отклонений. Ограниченная статистика не позволила подтвердить существование нейтрального партнера  $Z_b(10650)^0$ .

В четвёртой главе представлено изучение процесса  $e^+e^- \rightarrow B^{(*)}B^{(*)}\pi$  с частичной реконструкцией конечного состояния. Было проведено первое измерение сечений трехчастичных процессов  $e^+e^- \rightarrow BB^*\pi$  и  $e^+e^- \rightarrow B^*B^*\pi$ , а на величину сечения  $e^+e^- \rightarrow BB^*\pi$  наложен верхний предел. Было установлено, что доминирующими амплитудами являются  $e^+e^- \rightarrow Z_b(10610)^\pm\pi^\mp \rightarrow (BB^* + \bar{B}\bar{B}^*)^\pm\pi^\mp$  и  $e^+e^- \rightarrow Z_b(10650)^\pm\pi^\mp \rightarrow (B^*B^*)^\pm\pi^\mp$ .

Пятая глава посвящена описанию теоретических моделей, используемых для описания экзотических состояний. Основное внимание уделено предсказаниям молекулярной модели и их сравнению с экспериментальными результатами.

В шестой главе проведено сравнение экзотических чармониеподобных и боттомониеподобных состояний и намечены перспективы дальнейших исследований боттомониеподобных состояний.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

Все результаты, выносимые автором на защиту, в полной мере представлены в основных публикациях, указанных в автореферате. Язык и стиль изложения материала соответствует общепринятым научным нормам. Достоверность результатов подтверждается использованием современных методов моделирования и анализа данных. Основные результаты диссертации являются официальными результатами международной коллаборации Belle, что также подтверждает их достоверность. Текст автореферата полностью соответствует содержанию диссертации.

Небольшое количество опечаток и неточностей в тексте диссертации не создаёт проблем для её понимания. В качестве замечаний к диссертационной работе можно отметить следующее:

1. В диссертации не приведён конкретный вид используемой функции Брейт-Вигнера и обоснование её применимости.
2. В диссертации не везде полностью описан метод, использованный для оценки значимости, например в разделах 3.4.3 и 4.4.
3. В диссертации не описаны источники систематических неопределённостей эффективности триггера (2%) и полной энергии пучков в системе центра масс ( $\pm 3$  МэВ) в разделе 3.4.2.

Отмеченные выше недостатки не влияют на положительную оценку диссертационной работы, которая является глубоким и детальным научным исследованием. Автор провёл цикл измерений и всесторонне проанализировал полученные результаты. Совокупность представленных в диссертации результатов можно оценить как новое крупное научное достижение в развитии физики элементарных частиц.

По своей актуальности, новизне полученных результатов и важности научных выводов диссертация Гармаша А.Ю. «Изучение боттомониеподобных состояний в эксперименте Belle» соответствует всем критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора наук, установленным в «Положении о присуждении ученых степеней», утверждённом постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842 с дополнениями от 20 марта 2021 года № 426. Гармаш Алексей Юрьевич полностью заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц.

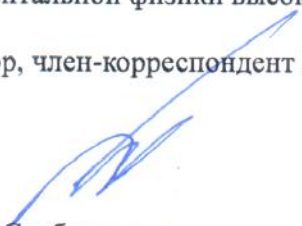
Отзыв составил: доктор физ.-мат. наук  
заведующий лабораторией тяжёлых частиц и резонансов  
Отдела экспериментальной физики высоких энергий  
НИИЯФ МГУ  
Тел.: (495)9393568, Эл. адрес: [gladilin@sinp.msu.ru](mailto:gladilin@sinp.msu.ru)



Гладилин Леонид Константинович

Результаты диссертации были рассмотрены и одобрены на семинаре Отдела экспериментальной физики высоких энергий Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ 14 марта 2022 г.

Заведующий Отдела экспериментальной физики высоких энергий  
НИИЯФ МГУ  
доктор физ.-мат. наук, профессор, член-корреспондент РАН



Босс Эдуард Эрнстович

Директор НИИЯФ имени Д.В. Скобельцына  
МГУ имени М.В. Ломоносова  
доктор физ.-мат. наук, профессор, член-корреспондент РАН



Босс Эдуард Эрнстович

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына (НИИЯФ МГУ)  
119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 2  
Тел.: +7(495) 939-18-18, факс: +7(495) 939-08-96  
Эл. адрес: [info@sinp.msu.ru](mailto:info@sinp.msu.ru)  
Сайт организации: <http://www.sinp.msu.ru/ru>